

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ПРОЦЕСС ПЕРЕХОДА НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ТУРБУЛЕНТНУЮ СТАДИЮ

Е. В. Левкина, Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский, О. Л. Кривонос, А. А. Половников, С. В. Фролов, С. А. Абакумов, В. В. Мармышев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Турбулентное перемешивание (ТП), возникающее при развитии неустойчивостей Рэлея – Тейлора (Р-Т) [1, 2] и Рихтмайера – Мешкова (Р-М) [3] на границах веществ разной плотности, может приводить к снижению коэффициента полезного действия мишеней инерциального термоядерного синтеза.

В настоящее время исследователи пытаются численно описать эти неустойчивости, чтобы учесть их влияние на процессы кумуляции энергии в таких конструкциях. Для тестирования расчетных методик используются результаты модельных экспериментов. Практически все модельные экспериментальные исследования проводятся при условии, когда вязкость мало влияет на развитие ТП [4, 5]. Но перемешивание может происходить и в вязких средах.

Процесс развития Р-Т неустойчивости условно разбивают на четыре стадии [6]:

1 – линейная (возмущение растет по амплитуде, не меняя формы и не нарушая симметрии);

2 – нелинейная (меняется форма возмущения, нарушается симметрия: выступы тяжелой жидкости сужаются в виде струй, а выступы легкой жидкости расширяются в виде округлых пузырей);

3 – стадия нарушения регулярного режима и перехода к турбулентному перемешиванию (струи начинают искривляться, часть пузырей укрупняется, подавляя соседей);

4 – стадия развитой турбулентности (образуется зона турбулентного перемешивания, ширина которой растет со временем).

Для тестирования расчетных методик важно знать, при каких условиях неустойчивость переходит в третью (турбулентную) стадию в вязких средах.

В работе приводятся экспериментальные исследования этого вопроса.

## Техника экспериментов

Эксперименты проводились на устройстве, схема которого представлена на рис. 1.

Устройство состояло из камеры сжатого газа, крышки, ускорительного канала  $\varnothing 50$  мм, прозрачного контейнера из оргстекла и разрушающейся диафрагмы из лавсановой пленки, закрывающей герметично нижний торец канала.

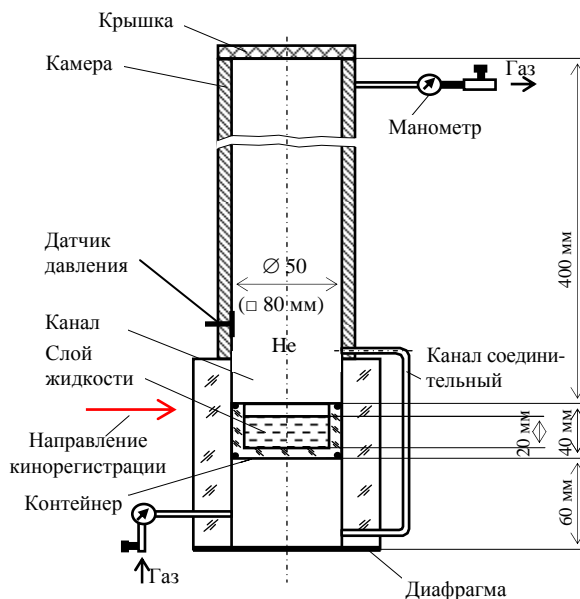


Рис. 1. Схема экспериментального устройства

Слой жидкости (глицерин, раствор глицерина или вода) заливался в контейнер, который изначально удерживался в канале за счет сил трения. Объем камеры и объем канала под контейнером заполнялись сжатым газом равного давления. Давление в объемах выравнялось через соединительный канал. Затем диафрагма разрушалась электровзрывом наклеенной на нее нихромовой проволоочки, газ из-под контейнера выходил в атмосферную среду, под действием давления над контейнером последний ускорялся вниз. На границе *газ-жидкость* развивалась неустойчивость Рэлея – Тейлора.

В некоторых опытах на свободную поверхность слоя для задания начальных возмущений насыпались твердые частицы (полипропиленовая крошка), расположенные хаотически (величина зерна – 0,4 мм, плотность  $0,91 \text{ г/см}^3$ ) или шарики диаметром 3 мм. Эти частицы создавали на поверхности жидкости начальные возмущения с характерной длиной волны  $\lambda \approx 0,4$  мм и 3 мм с амплитудой  $a \approx \lambda/2$  соответственно.

Процесс ускорения слоя и развития неустойчивости регистрировался скоростной видеокамерой типа VS-FAST.

Коэффициент  $\eta$  динамической вязкости и плотность водных растворов глицерина определялись по данным [8].

## Результаты экспериментов и их анализ

Известно [7], что вязкость подавляет развитие коротковолновых возмущений. При повышении ускорения (или числа Рейнольдса) роль вязкости в развитии перемешивания должна снижаться.

В случае Р-Т неустойчивости вязких жидкостей инкремент роста амплитуды возмущения с волновым числом  $k = 2\pi/\lambda$  равен в линейном приближении [7]

$$\gamma = \sqrt{Akg + v^2k^4} - vk^2, \quad (1)$$

где  $A$  – число Атвуда –  $A = (\rho_T - \rho_L)/(\rho_T + \rho_L)$ .

Длина волны  $\lambda_P$  наиболее быстро растущей гармонике определяется условием  $\partial\gamma/\partial k = 0$ , откуда получаем

$$\lambda_P = 4\pi^3 \sqrt{\frac{v^2}{Ag}}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что рост вязкости жидкости при фиксированных значениях ускорения приводит к росту длинноволновых возмущений.

Время перехода к турбулентному режиму развития возмущения  $\tau$  по порядку величины обратно пропорционально максимальному значению инкремента роста амплитуды возмущения [9]:

$$\tau = 3 \sqrt{\frac{v}{(Ag)^2}}. \quad (3)$$

Следовательно, рост вязкости жидкости при фиксированных значениях ускорения приведет к затягиванию времени перехода к ТП. Рост ускорения приводит к сокращению времени перехода. В эксперименте за  $\tau$  будем понимать время, при котором на контактной границе появляется ансамбль пузырей и струй.

Эксперименты условно разбиты на три группы. Некоторые условия их проведения представлены в таблице.

Группа опытов	№ опыта	Вещество	Драйвер	$P$ , атм	$m$ , г	$T$ , °C	$\lambda$ , мм	$\eta$ , спз	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$v = \eta/\rho$ , 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup> /с	$g_{\max}$ , м/с <sup>2</sup>	$Re_{\max}$	$\lambda_P$ , мм	$\tau$ , мс
I	902	Глицерин	Воздух	1	90,15	20	–	1495	1,26	1,18	1466	10 <sup>3</sup>	12,4	0,82
	903	Глицерин	Воздух	1	90,15	20	–	1495	1,26	1,18	1111	1,4·10 <sup>3</sup>	13,5	0,99
	904	Глицерин	Воздух	1	90,15	20	–	1495	1,26	1,18	766	860	15,3	1,26
	905	Глицерин	Воздух	2	90,15	19	–	1635	1,26	1,29	3350	5·10 <sup>3</sup>	10	0,49
	906	Глицерин	Воздух	4	90,15	20	–	1495	1,26	1,18	6460	1,4·10 <sup>4</sup>	7,5	0,3
	907	Глицерин	Воздух	4	142,2	20	–	1495	1,26	1,18	2450	2·10 <sup>3</sup>	10,4	0,58
	912	Глицерин	Гелий	8	90,15	19	–	1635	1,26	1,29	15310	1,5·10 <sup>4</sup>	6	1,18
	914	Глицерин	Гелий	30	100	20	–	1495	1,26	1,18	46885	1,6·10 <sup>4</sup>	3,9	0,8
	915	96 % глицерина	Гелий	8	90,15	17	–	835	1,25	0,67	15485	1,9·10 <sup>4</sup>	3,9	0,14
	920	Глицерин	Гелий	4	90,1	20	–	1495	1,26	1,18	7722	5·10 <sup>3</sup>	7,1	0,27
	982	Глицерин	Воздух	4	140	21	–	1365	1,26	1	4670	3,6·10 <sup>3</sup>	7,5	0,36
	983	94 % глицерина	Воздух	4,5	104,2	20	–	475	1,25	0,38	7560	2·10 <sup>4</sup>	3,4	0,19
984	92 % глицерина	Воздух	4,5	103,7	22	–	310	1,24	0,25	7690	2,9·10 <sup>4</sup>	2,5	0,16	
II	916	80 % глицерина	Гелий	8	91	18	–	70	1,21	0,058	16459	2,4·10 <sup>5</sup>	0,7	0,06
	918	Вода	Гелий	8	91	20	–	1	1	0,001	16330	3,5·10 <sup>6</sup>	0,05	0,02
	919	80 % глицерина	Гелий	4,5	70	20	0,4	61,8	1,21	0,05	10156	3·10 <sup>4</sup>	0,8	0,08
	921	96 % глицерина	Гелий	4	90,1	20	3	659	1,25	0,53	7588	3,3·10 <sup>3</sup>	4,2	0,21
	923	Вода	Гелий	4	90,15	20	0,4	1	1	0,001	7520	3,4·10 <sup>6</sup>	0,06	0,03
	924	90 % глицерина	Гелий	2,5	68	20	0,4	330	1,23	0,27	8357	8·10 <sup>4</sup>	2,6	0,16
III	956	Глицерин	Воздух	5	256	24	–	1035	1,26	0,82	10580	7,6·10 <sup>3</sup>	5	0,19
	957	Глицерин	Воздух	2,2	256	24	–	1035	1,26	0,82	4853	2·10 <sup>3</sup>	6,5	0,33
	959	Глицерин	Воздух	1	218	24	–	1035	1,26	0,82	1990	810	8,8	0,59

В таблице обозначено:  $P$  – давление (избыточное) сжатого газа (погрешность  $\pm 0,1$  атм);  $T$  – температура окружающей среды;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости (погрешность  $\pm 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ );  $g_{\text{max}}$  – максимальное ускорение слоя в эксперименте (получено по  $S(t)$ -диаграмме);  $\lambda$  – характерная длина волны начального возмущения;  $m$  – суммарная масса ускоряемого слоя (погрешность  $\pm 2$  г);  $Re_{\text{max}}$  – максимальное число Рейнольдса в эксперименте.

Значения  $\lambda_p$  и  $\tau$  определены по формулам (2) и (3) соответственно.

В данной работе  $Re$  определялось как  $Re = \frac{g^2 t^3}{\nu}$ .

Каждый видеок кадр, полученный в экспериментах, обмерялся на ПЭВМ.

По результатам обработки строились зависимости  $h_{\text{ЛТ}}(2S)$  и  $h_{\text{СТР}}(2S)$ . Тангенс угла наклона линейной части этих зависимостей к оси абсцисс характеризует темп (скорость) проникновения газа в жидкость

$\beta_{\text{ЛТ}}$  и струи жидкости в газ- $\beta_c$ :  $\beta_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta 2S}$ . Погрешности измерений составляют:  $\Delta S \approx \pm 0,3$  мм;  $\Delta h_{\text{ЛТ}} \approx \pm 0,5$  мм;  $\Delta h_{\text{ТЛ}} = (0,5-1)$  мм;  $\Delta h_{\text{СТР}} = (0,5-1)$  мм;  $\Delta t = 0,5\%$   $t$ ;  $\Delta \beta_{\text{ЛТ}} = \pm 0,01$ ;  $\Delta \beta_c = \pm 0,02$ , где  $t$  – время регистрации,  $S$  – смещение слоя.

### Эксперименты I группы

В этих экспериментах слой жидкости заливался в контейнер с внутренним диаметром  $\varnothing 42,5$  мм; начальные возмущения на поверхности слоя не задавались. Максимальное число Рейнольдса составляло  $3 \cdot 10^4$ .

На рис. 2, 3 в одинаковом масштабе представлены отдельные кадры кинограмм некоторых из проведенных опытов, на рис. 4 – зависимости проникновения струи жидкости в газ  $h_{\text{СТР}}(2S)$ .

Согласно формуле (2) в экспериментах этой группы на поверхности слоя жидкости должно развиваться возмущение с длиной волны, равной по меньшей мере 15,3 мм (см. таблицу). То есть, учитывая, что диаметр контейнера равен 42,5 мм, на кинограммах мы должны были наблюдать не менее двух развивающихся возмущений. Но мы видим иную картину.

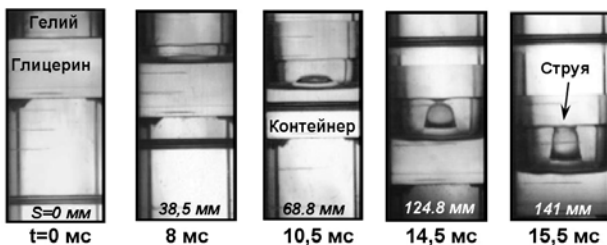


Рис. 2. Кинограмма опыта № 902 (глицерин,  $Re_{\text{max}} = 10^3$ )

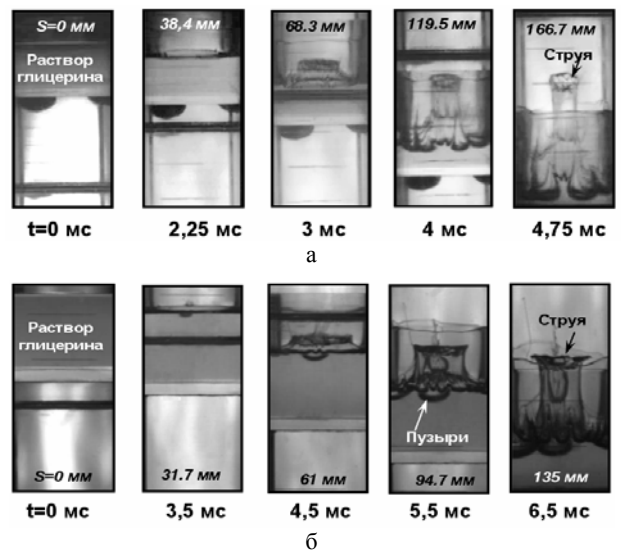


Рис. 3. Кинограммы экспериментов I группы: а – опыт № 915 (96 % глицерина,  $Re_{\text{max}} = 1,910^4$ ); б – опыт № 983 (94 % глицерина,  $Re_{\text{max}} = 2 \cdot 10^4$ )

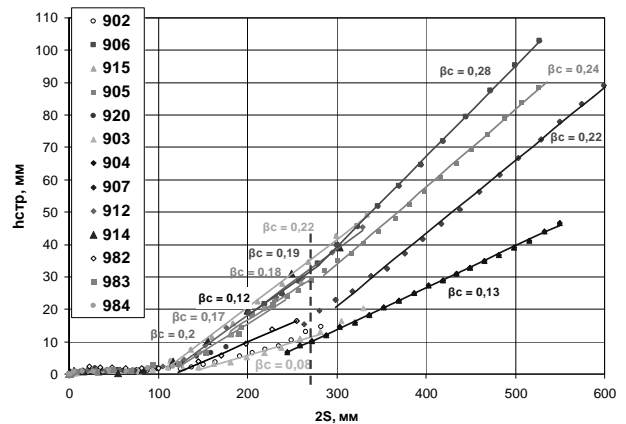


Рис. 4. Проникновение струи жидкости в газ  $h_{\text{СТР}}(2S)$  в экспериментах I группы

При  $0 < S \leq 60$  мм происходит колебание контактной границы, затем при  $S \geq 60$  мм наблюдается образование одной струи, которая растет со временем. При  $60 \text{ мм} < S \leq 140$  мм скорость роста струи носит характер, близкий к линейному (см. рис. 2–4). В этом диапазоне  $S$  с увеличением  $Re$   $\beta_c$  увеличивается, а при  $Re > 3000$  – выходит на постоянное значение (см. рис. 5).

Образование одиночной струи можно объяснить развитием крупномасштабного 3D-возмущения, длина волны которого сравнима с поперечным сечением контейнера.

Согласно формуле (3) зона ТП на поверхности слоя, не занятой струей, должна образовываться по крайней мере при  $\tau_{\text{max}} > 1,26$  мс (см. таблицу). Но на кинограммах опытов (см. рис. 2, 3) мы наблюдаем лишь отдельные пузыри, которые принимать за зону ТП некорректно. Поэтому для этих опытов

формула (3) не применима. Лишь в опыте № 984 при  $Re > 2 \cdot 10^4$  ( $S > 70$  мм) наблюдается развитие перемешивания, но оно начинается при  $t \geq 5$  мс, т. е. согласно с формулой (3) даже по порядку величины не наблюдается и здесь (см. таблицу).

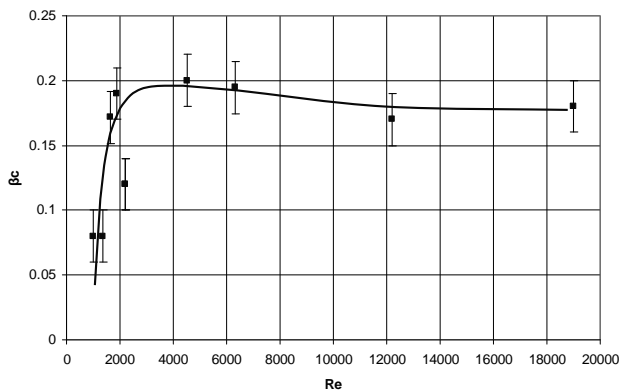


Рис. 5. Зависимость темпа роста струи жидкости  $\beta_C$  от числа Рейнольдса  $Re$  ( $Re$  определялось при  $S \approx 60$  мм)

Таким образом, в этой группе опытов при  $Re_{\max} \leq 3 \cdot 10^4$  на контактной границе происходит лишь развитие возмущений.

### Эксперименты II группы

В этих экспериментах слой жидкости также заливался в контейнер с внутренним диаметром  $\varnothing 42,5$  мм. В некоторых экспериментах на поверхности слоя задавались начальные возмущения. Максимальное число Рейнольдса достигало  $3,5 \cdot 10^6$ .

На рис. 6 в одинаковом масштабе представлены отдельные кадры кинограмм некоторых из проведенных опытов, на рис. 7 – зависимости проникновения газа в жидкость  $h_{ЛТ}(2S)$ .

Во всех экспериментах этой группы на контактной границе (КГ) развивается зона турбулентного перемешивания. Отметим, что количественные характеристики ширины зоны можно анализировать при смещении слоя  $0 < S < 50$  мм. При  $S > 50$  мм на развитие зоны могут оказывать влияние стенки контейнера.

По результатам экспериментов можно отметить следующее:

- Начальные возмущения на контактной границе приводят к относительно быстрому зарождению зоны перемешивания: в опыте № 915 (I группа, без начальных возмущений,  $Re_{\max} = 1,9 \cdot 10^4$ ) развивается струя, в опыте № 921 (с начальными возмущениями  $\lambda = 3$  мм) при  $Re \approx 10^3$  ( $2S \approx 30$  мм) – зона перемешивания с крупными структурами (см. рис. 3,б и 6,б). То есть начальные возмущения примерно на порядок понижают число Рейнольдса, при котором начинается перемешивание вязкой жидкости с газом.

- В целом, с повышением числа Рейнольдса зависимость  $h_{ЛТ}(2S)$  смещается вверх, но наблюдаются и аномальные явления. В опыте № 916 при  $Re \approx 5 \cdot 10^4$  в диапазоне  $15 \text{ мм} < 2S < 30 \text{ мм}$  наблюдается резкий рост  $h_{ЛТ}$ , а при  $2S > 30$  мм он уменьшается (см. рис. 7). Это может быть связано, как и в [9], с образованием (из-за вязкости) возмущений с относительно большими длинами волн, из которых развиваются крупные пузыри.

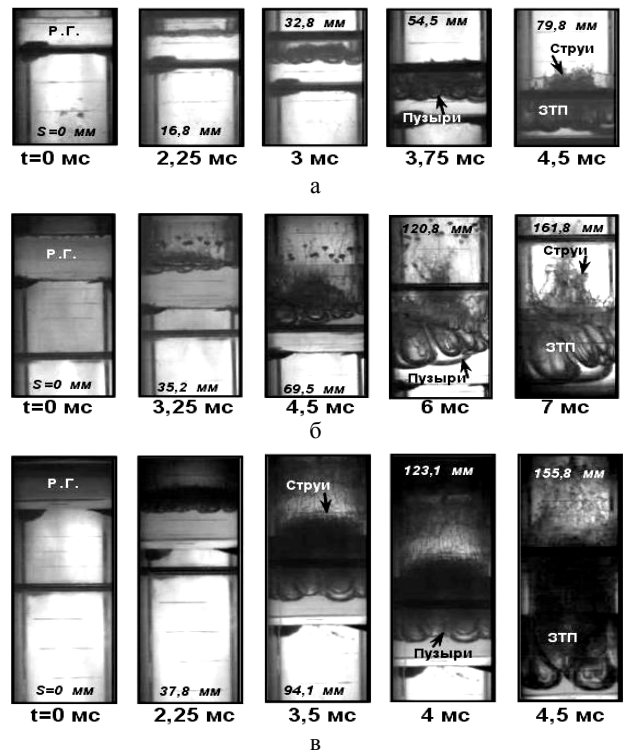


Рис. 6. Кинограммы экспериментов II группы с заданными начальными возмущениями: а – опыт № 919 (80 % глицерина,  $\lambda = 0,4$  мм,  $Re_{\max} = 3 \cdot 10^4$ ); б – опыт № 921 (95 % глицерина,  $\lambda = 3$  мм,  $Re_{\max} = 3,3 \cdot 10^3$ ); в – опыт № 916 (80 % глицерина,  $Re_{\max} = 2,5 \cdot 10^5$ ); П. Г. – раствор глицерина; ЗТП – зона турбулентного перемешивания

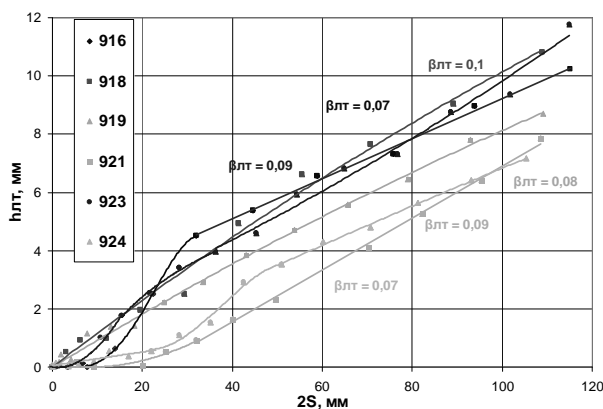


Рис. 7. Зависимость  $h_{ЛТ}(2S)$  для экспериментов II группы

### Эксперименты III группы

В этих экспериментах слой жидкости заливался в контейнер с внутренним сечением (70 × 70) мм; начальные возмущения на поверхности слоя не задавались. Максимальное число Рейнольдса достигало  $7 \cdot 10^3$ .

На рис. 8, 9 в одинаковом масштабе представлены отдельные кадры кинограмм проведенных опытов.

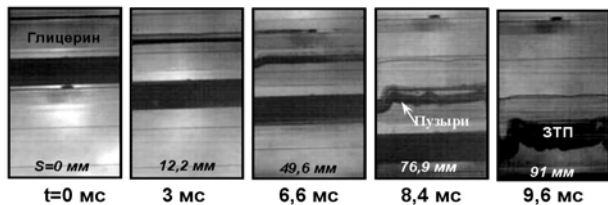
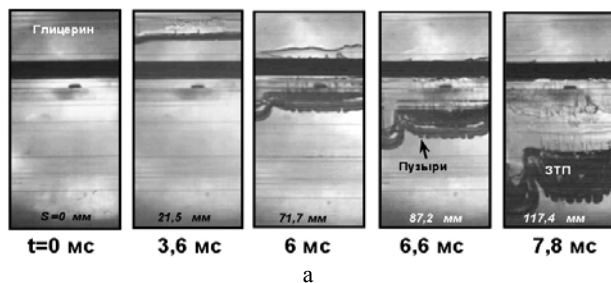
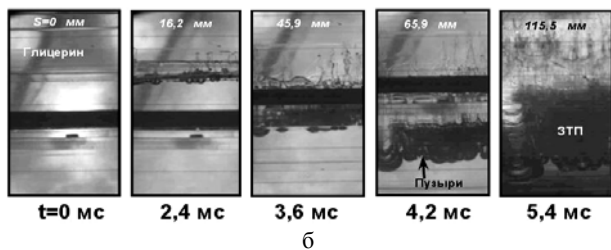


Рис. 8. Кинограмма опыта № 959 (глицерин,  $Re_{\max} = 8 \cdot 10^2$ )



а



б

Рис. 9. Кинограмма экспериментов III группы:

а – опыт № 957 (глицерин,  $Re_{\max} = 2 \cdot 10^3$ );

б – опыт № 956 (глицерин,  $Re_{\max} = 7,6 \cdot 10^3$ )

В экспериментах этой группы при относительно низком значении числа Рейнольдса ( $Re < 1000$ ) на контактной границе развивается длинноволновое возмущение. Затем при  $1000 < Re < 2500$  оно распадается на отдельные пузырьки, а при  $Re > 4000$  в опытах № 956 и 957 наблюдается образование зоны перемешивания жидкости с газом (см. рис. 8, 9).

Сравним результаты экспериментов I и III групп. При близких числах Рейнольдса в экспериментах I группы образуется струя, а в опытах III группы – зона перемешивания. Это объясняется тем, что в первом случае развитие длинноволнового возмущения ограничивается стенками контейнера, в результате чего оно искажается и приводит к образованию одиночной

пятствуют развитию длинноволнового возмущения. В процессе ускорения контейнера оно колеблется и распадается на коротковолновые возмущения, развитие которых приводит к образованию зоны перемешивания.

На рис. 10 представлена оценочная зависимость времени перехода развития возмущения в турбулентную стадию  $\tau$  от натурального логарифма числа Рейнольдса, построенная по результатам экспериментов II и III групп без заданных начальных возмущений.

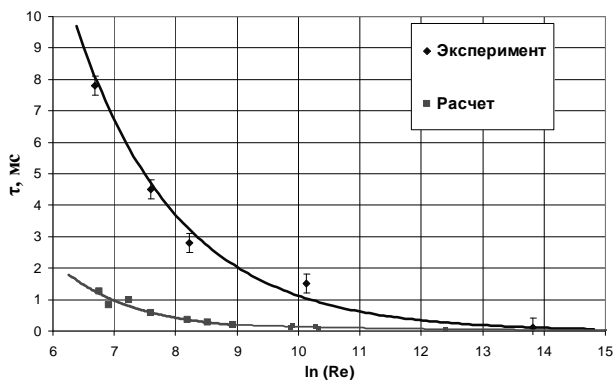


Рис. 10. Зависимость  $\tau$  ( $\ln(Re)$ )

По графику видно, что время перехода развития возмущений в турбулентную стадию  $\tau$  в экспериментах с вязкой жидкостью значительно выше значения, определенного по формуле (3) (см. таблицу).

По результатам обработки экспериментов № 916 и 918 можно сказать, что при отсутствии специально заданных начальных возмущений на контактной границе вязкой жидкости с газом режим турбулентного перемешивания реализуется при  $Re \geq 10^5$ . Подчеркнем, что этот режим нельзя трактовать как режим развитой турбулентности, при котором вязкость не влияет на перемешивание. Такой режим наступает, видимо, при более высоких числах Рейнольдса. Однако, его исследования выходят за рамки данной работы.

## Заключение

В экспериментах получены следующие результаты:

1. При числах Рейнольдса  $Re < 10^4$  на контактной границе развиваются длинноволновые возмущения. Если имеется ограничение развития этого возмущения жесткой стенкой (контейнером), оно искажается, и образуется струя, направленная в газ. При отсутствии такого ограничения длинноволновое возмущение со временем распадается на коротковолновые, развитие которых приводит к перемешиванию жидкости и газа.

2. Заданные на контактной границе коротковолновые возмущения значительно (на порядок) уменьшают число  $Re$ , при котором неустойчивость переходит в стадию перемешивания.

## Литература

1. Lord Rayleigh // Proc. London Math. Soc. 1883. Vol. 14.

2. Taylor G. I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // I. Proc. Roy. Soc. 1950. Vol. A201.

3. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // МЖГ. Изв. АН СССР. 1969. № 5. С. 151–158.

4. Кучеренко Ю. А., Томащев Г. Г., Шибаршов Л. И. Экспериментальное исследование гравитационного турбулентного перемешивания в автомодельном режиме // ВАНТ. 1988. Вып. 1. С. 13.

5. Read K. I. Experimental investigation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability // Physica D12. 1984. P. 45.

6. Мешков Е. Е. Неустойчивость Рэлея – Тейлора. Исследования в лабораторных экспериментах. Саров, 2002. С. 35.

7. Sharp D. H. An overview of Rayleigh-Taylor instability. Fronts, Interfaces and Patterns // Proc. of the III Ann. Int. Conf of the Center for Nonlinear Studies. Los Alamos., New Mexico. 1983. North-Holland Physics publishing. 1984. P. 3–18.

8. Кэй Д. Ж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М., 1962. С. 248.

9. Блинецов М. В., Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А. и др. Исследование влияния вязкости на развитие турбулентного перемешивания на границе газ-жидкость: Докл. на VIII Забабахинские научные чтения. Россия. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005.